
Procédure adaptative pour le calcul des structures : application à la mise en forme des matériaux solides

A. Cherouat* – H. Borouchaki* – K. Saanouni* – P. Laug**

*LASMIS CNRS FRE 2719 - Université de Technologie de Troyes
B.P. 2060 – 10010 Troyes France

**INRIA, Rocquencourt
BP 105 -78153 - Le Chesnay - France

RÉSUMÉ. Cet article présente une méthodologie de formage virtuel de structures qui permet de simuler numériquement divers procédés de mise en forme. Cette méthodologie est basée un modèle élastoplastique intégrant l'écrouissage isotrope et cinématique non linéaire, fortement couplé à l'endommagement ductile isotrope. Les différentes étapes nécessaires aux remaillages adaptatifs en mise en forme des matériaux et de structures sont données. Ses étapes sont constituées essentiellement d'estimateur d'erreur d'interpolation permettant de générer une nouvelle discrétisation gouvernée soit par les variations de la courbure (forme des outils) sur la nouvelle frontière soit par une combinaison de ces variations avec d'autres cartes de métriques de nature physique (déformation plastique ou endommagement). Le maillage du domaine est alors construit selon les directives (tailles de maille, points de contrôle) par les méthodes classiques de h-adaptation basées sur une approche combinée frontale-Delaunay. La méthodologie proposée a été intégrée dans un environnement de calcul utilisant le code Abaqus/Explicit et le logiciel de maillage et remaillage de BL2D-V2. Des exemples 2D sont proposés pour illustrer l'efficacité de cette méthode.

ABSTRACT. This article presents a numerical methodology which aims to improve virtually any metal forming processes. This methodology is based on elastoplastic constitutive equations accounting for non-linear mixed isotropic and kinematic hardening coupled with isotropic ductile damage. The necessary steps to remesh a damaged structure in finite element simulation of forming processes including damage occurrence (initiation and growth) are given. An important part of this procedure is constituted by geometrical and physical error estimates. The meshing and remeshing procedures are automatic and are implemented in a computational finite element analysis package (ABAQUS/Explicit solver using the Vumat user subroutine and BL2D-V2 adaptive mesher). The proposed approach is based A 2D examples are provided to emphasize the efficiency of the proposed method.

MOTS-CLÉS : Endommagement ductile, élastoplasticité, grandes déformations, remaillage adaptatif, éléments finis, mise en forme

KEYWORDS: Ductile damage, elastoplasticity, finite transformations, adaptive remeshing, finite elements, metal forming.

1. Introduction

Lors de la fabrication ou la mise en forme de pièces mécaniques de structure, les matériaux sont soumis à de grandes déformations irréversibles en plus du contact-frottement évolutif et des transferts thermiques entre pièces et outils. Ces grandes déformations (visco)-plastiques génèrent souvent des micro-défauts surfaciques ou volumiques qui naissent et se développent dans la pièce. L'évolution de ces défauts dans la pièce au cours de sa mise en forme, conduit à la création de fissures macroscopiques pouvant être soit immédiatement visibles provoquant la perte de celle-ci avant son utilisation, soit volumiques non visibles mettant ainsi en danger l'intégrité de la pièce en service avec des conséquences souvent dramatiques (Saanouni *et al.*, 2003). La simulation numérique par élément finis des procédés de fabrication ou de mise en forme est aujourd'hui une réalité industrielle. Elle permet de mettre au point virtuellement, à moindre coût, des gammes de formage de procédés complexes vis-à-vis de l'avènement de la rupture ductile, en évitant de recourir à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction. Cependant peu de ces logiciels permettent aujourd'hui de simuler le phénomène d'endommagement ductile et son effet sur les champs thermo-mécaniques en cours d'opération de formage. Dans cette étude, on propose une méthodologie (outils théoriques, numériques et géométriques) de formage virtuel de structures qui permet de simuler numériquement des procédés de mise en forme tout en agissant sur les paramètres technologiques pertinents du procédé de sorte à :

- Soit minimiser l'endommagement ductile afin d'obtenir une pièce saine sans aucun défaut ni volumique ni surfacique (forgeage, estampage, extrusion, emboutissage, hydroformage de tôles ou de tubes,) ;
- Soit favoriser l'endommagement ductile en direction et en intensité afin de reproduire des opérations de coupe (poinçonnage, cisailage, guillotinage, dérivage, usinage par enlèvement de copeaux,)

2. Présentation de la modélisation mécanique et numérique

2.1. Résumé du modèle mécanique

Le comportement élastoplastique couplé à l'endommagement est décrit dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles avec variables d'état. Nous limitons la formulation au cas isotherme, avec l'hypothèse d'une seule surface de charge pour la plasticité et l'endommagement isotrope. Les phénomènes physiques pris en compte peuvent être représentés par des variables d'état (observables ou internes). Le Tableau 1 récapitule les équations constitutives couplées dérivant d'un potentiel dissipatif d'état (Saanouni *et al.* 2003).

Variable des contraintes	Variables de déformations
$\underline{\sigma} = (1-D)[\lambda \text{tr}(\underline{\varepsilon}_e)\underline{I} + 2\mu \underline{\varepsilon}_e]$ $R = Q(1-D)r$ $\begin{cases} Y(\underline{\sigma}) = \frac{J_2^2(\underline{\sigma})}{2E(1-D)^2} \sigma^* + \frac{1}{2} \frac{R^2}{Q(1-D)^2} \\ \sigma^* = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{<\sigma_H>}{J_2(\underline{\sigma})} \right)^2 \end{cases}$	$\dot{\underline{\varepsilon}}_p = \frac{3}{2} \frac{\dot{\delta}}{\sqrt{1-D}} \frac{\underline{S}}{J_2(\underline{\sigma})} = \dot{\delta} \underline{n}$ $\dot{r} = \dot{\delta} \left(\frac{1}{\sqrt{1-D}} - br \right)$ $\dot{D} = \dot{\delta} \left(\frac{Y(\underline{\sigma})}{A} \right)^a \frac{1}{(1-D)^\beta}$

Tableau 1. Présentation des équations constitutives couplées

Le multiplicateur plastique δ est déterminé par la condition de consistance associé au critère de charge-décharge $f \leq 0$; $\dot{\delta} \leq 0$ et $\dot{\delta}f = 0$ avec $f(\underline{\sigma}, R) = \frac{J_2(\underline{\sigma}) - R}{\sqrt{1-D}} - \sigma_y = 0$:

$$\dot{\delta} = \begin{cases} \frac{1}{H} \left\langle 3\mu\sqrt{1-D} \frac{\underline{S}}{J_2(\underline{\sigma})} : \underline{D} \right\rangle & \text{si } f = \dot{f} = 0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad H = 3\mu + Q - \frac{bR}{\sqrt{1-D}} + \frac{\sigma_y}{2(1-D)^{\beta+1}} \left(\frac{Y}{A} \right)^a$$

2.2. Résumé du modèle géométrique

La mise en forme des matériaux par grandes déformations élasto-(visco)plastiques nécessite des remaillages fréquents du domaine. De plus, la convergence et la qualité de la solution recherchée dépendent de la qualité en forme et en taille des éléments du maillage et de l'approximation utilisée. L'adaptation par raffinement de maillage au comportement physique du problème permet d'améliorer la solution à moindre coût grâce au contrôle de l'erreur de la discrétisation et au choix d'une triangulation appropriée (Ortiz 1991), (Verfürth 1994) et (Borouchaki et al. 2002). Par ailleurs, les éléments totalement endommagés doivent être éliminés car ils n'ont plus de rigidité et ne transmettent aucun effort ni de chaleur. Les étapes de remaillage sont constituées essentiellement d'estimateur d'erreur d'interpolation permettant de générer une nouvelle discrétisation gouvernée soit par les variations de la courbure sur la nouvelle frontière soit par une combinaison de ces variations avec d'autres cartes de métriques de nature physique (déformation plastique équivalente, contrainte équivalente ou endommagement). Le maillage "optimal" du domaine est alors construit selon les directives (tailles de maille, points de contrôle)

par les méthodes classiques de h-adaptation basées sur une approche combinée frontale-Delaunay (Laug et *al.* 2003).

La procédure de remaillage de structures 2D au cours du calcul comprend :

- Maillage des outils par des segments courbes (ou splines) dans l'espace \mathbb{R}^2 selon une taille spécifique; et construction du maillage du domaine par génération des nœuds et des éléments linéaires triangulaires (T3) selon les cartes de spécifications;
- (1) Calcul de la solution éléments finis associée au maillage $\mathcal{T}(\Omega)$ en grandes déformations élastoplastiques avec endommagement avec Abaqus;
- Analyse de la qualité géométrique du domaine déformé via un estimateur d'erreur géométrique qui tient compte des variations de courbure et de la distance de Hausdorff de la pièce à l'outil. Calcul de la carte de tailles géométrique $\mathcal{H}_G(\Omega)$;
- Analyse de la qualité de la solution via un estimateur d'erreur physique qui tient compte du gradient des variables mécaniques du problème (ici déformation plastique ou endommagement). Calcul de la carte de tailles physique $\mathcal{H}_{P1}(\Omega)$;
- Analyse des éléments endommagés. Une taille minimale d'élément est associée à l'élément totalement endommagé (valeur 1) et une taille maximale d'élément à un élément vierge et une variation de taille linéaire pour les autres éléments. Calcul de la carte de tailles physique $\mathcal{H}_{P2}(\Omega)$;
- Remaillage du domaine en tenant compte de la carte de taille $\mathcal{H}(\Omega)$ obtenue par fusion de $\mathcal{H}_G(\Omega)$ et de $\mathcal{H}_{P1}(\Omega)$ et $\mathcal{H}_{P2}(\Omega)$;
- Test sur l'endommagement; les éléments sont supprimés du maillage s'ils sont totalement endommagés ($D=1$) tout en évitant la création de nœuds multiples;
- Transfert adéquat des champs mécaniques actuels (contraintes, déformations plastiques, variables d'état) de l'ancien maillage vers le nouveau maillage par interpolation linéaire des points de Gauss correspondants;
- Réitération des calculs de (1) jusqu'au chargement final.

3. Applications

La procédure décrite ci-dessus est d'abord appliquée à divers procédés de mise en forme. Le premier exemple concerne l'usinage orthogonal par enlèvement de matière d'une pièce avec un outil de coupe rigide. Deux exemples de découpage orthogonal sont traités. Un découpage avec un outil dont l'angle de coupe fait 5° (Figure 1 à gauche) et un découpage avec un outil dont l'angle de coupe fait 10° avec la verticale (Figure 1 à droite). On constate sur ces images qu'un copeau est formé grâce à la déformation imposée par suppression d'éléments totalement endommagés. On note une différence sur l'amorçage, la propagation et la segmentation du copeau dans les deux cas. Le second exemple représente le poinçonnage d'une tôle avec outil usé et outil neuf. La Figure 2 montre les remaillages adaptés aux champs d'endommagement de la pièce ainsi que les

isovaleurs associées correspondant à différents déplacements du poinçon (les zones rouges désignant les régions les plus endommagées). On constate sur ces images que les zones de contact avec les outils (adaptation géométrique) ainsi que les zones de localisation de l'endommagement (adaptation physique) sont raffinées. Dans le cas d'un poinçonnage avec des outils usés le découpage est plus difficile et nécessite un grand déplacement de l'outil coupant. Dans l'exemple trois, il s'agit d'extruder (Figure 3 à gauche) et de percer (Figure 3 à droite) une pièce axisymétrique complexe. Ces Figures montrent deux configurations de l'opération d'extrusion de perçage. On constate que le champ d'endommagement reste très faible lors de l'opération d'extrusion $< 20\%$. On peut aussi observer que l'adaptation du maillage au cours de la mise en forme respecte les contours géométriques des outils (poinçon, matrice et foret) et le champ physique (déformation plastique équivalente) dans la pièce. Le dernier exemple traite l'enlèvement de la matière avec un outil de fraise. La Figure 4 montre quelques étapes du procédé (endommagement et déformée de la pièce). On note l'adaptation des maillages aux fortes déformations et aux courbures des dents de la fraise.

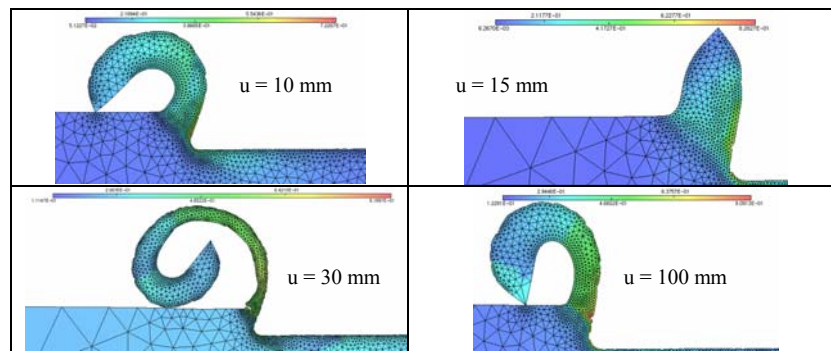


Figure 1. Découpage orthogonal avec angle de 5° (à gauche) et 10° (à droite)

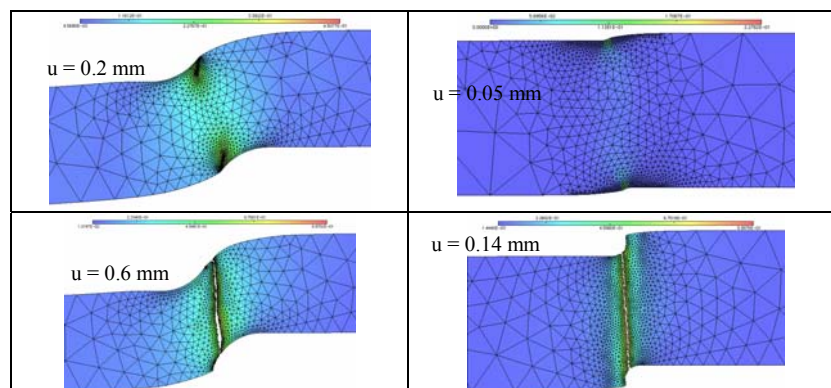


Figure 2. Poinçonnage avec outil usés (à gauche) et outil neuf (à droite)

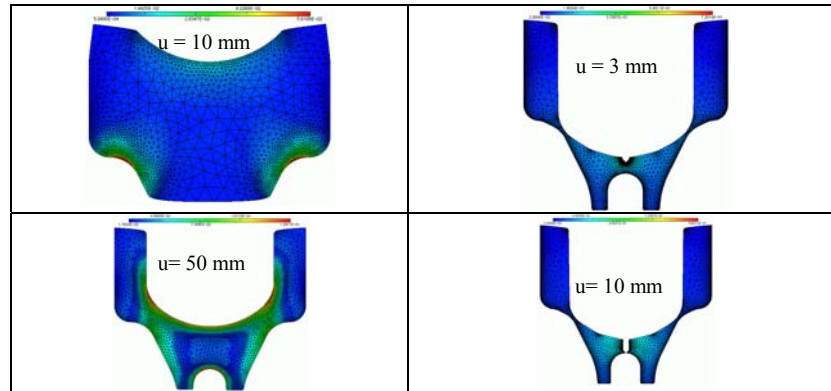


Figure 3. Extrusion 2D (à gauche) et perçage d'une pièce axisymétrique (à droite)

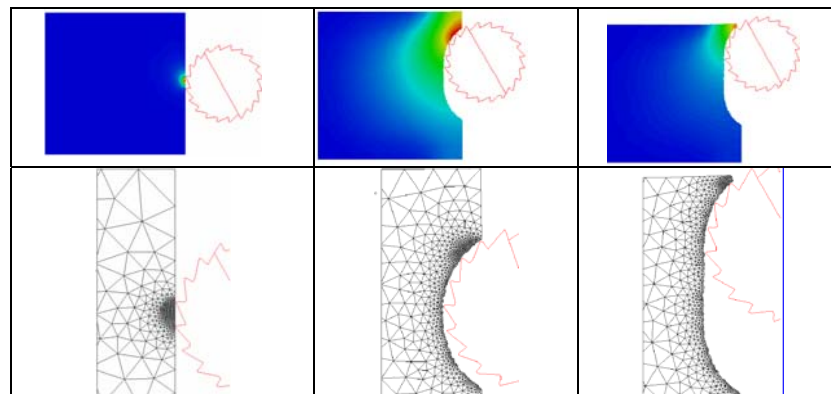


Figure 4. Fraisage : endommagement (en haut) et maillage déformé (en bas)

4. Bibliographie

- H. Borouchaki, A. Cherouat, P. Laug & K. Saanouni, Adaptive remeshing for ductile fracture prediction in metal forming, C.R. Acad. Sci. Paris, Série. II B, Mécanique des solides et des structures, vol. 330 (10), p. 709-716, 2002.
- P. Laug & H. Borouchaki, BL2D-V2 : Mailleur bidimensionnel adaptatif, Rapport INRIA RT-0275, 2003.
- K. Saanouni & J.L., Chaboche Computational damage mechanics. Application to metal forming, Numerical and Computational methods. chap. 3, p. 321-376. 2003.

- M. Ortiz & J.L. Quigley, "Adaptive mesh refinement in strain localization problems", Comput. Methods Appl. Mech. Engng., vol. 90, p. 781-804, 1991.
- R. Verfürth, "A posteriori error estimation and adaptive mesh-refinement techniques", J. of Comput. and Appl. Mathematics, vol. 50, p. 67-83, 1994.